

内蒙农牧交错带地区土地利用方式和施肥对土壤碳库的影响^{*}

张煜 张琳 吴文良 孟凡乔[†]

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要 内蒙武川是我国典型的内蒙农牧交错带地区, 土地利用方式转变和施肥是影响该地区农业生产和土壤碳储量的重要人类活动。选取内蒙武川地区, 针对不同土地利用方式(耕地、退耕还林/还草)和施肥措施(化肥、有机肥)的长期定位试验土壤, 分析土壤有机碳(SOC)、土壤无机碳(SIC)和全氮(TN)含量和储量, 结合¹³C和¹⁵N稳定同位素方法, 研究土地利用方式和施肥措施对于该地区土壤碳氮转化的影响规律。研究表明, 退耕还灌/还草后, SOC储量较耕地均有显著提高(提高幅度0.60~0.98 Mg hm⁻² a⁻¹), SIC储量也增加或保持相同水平(柠条地除外)。相比不施肥处理, 施用有机肥能显著增加SOC(1.08~1.19 Mg hm⁻² a⁻¹), 施化肥处理则会降低SIC(0.06~0.16 Mg hm⁻² a⁻¹), 且主要影响次生碳酸盐。施肥SIC中原生碳酸盐比例(0~23%)低于自然土壤(3%~29%)。施肥措施对于土壤碳氮的转化强度远大于土地利用方式的改变。对于内蒙等干旱半干旱地区土壤, 土地利用和施肥措施对于土壤有机和无机碳的影响应该在区域固碳管理中给予全面考虑。

关键词 施肥措施; 土地利用; 有机碳; 无机碳; 同位素; 固碳

中图分类号 S158.2 **文献标识码** A

土壤碳库是地球表层系统中最大的碳库, 其变化将显著影响温室气体浓度与陆地生态系统功能^[1], 因此土壤碳循环越来越受到国内外科学界的关注。土壤碳特别是土壤有机碳(soil organic carbon, SOC), 对于提供作物养分、创造作物生长所需的良好结构以及影响全球碳平衡等方面具有重要作用, 主要影响因素包括土地利用方式、农田管理措施等。一般认为, 农田恢复为草地后, 土壤碳最终能达到或接近原始植被条件下的碳水平, 并保持一个新平衡^[2]。施肥作为主要的农田管理措施, 通过两条途径影响SOC含量及动态: 一是提高农作物生物产量, 增加植物残渣和根的输入; 二是影响土壤微生物的数量和活性, 进而影响SOC的生物降解过程^[3]。

在土壤碳循环过程中, 碳稳定同位素¹³C含量可以反映SOC分解程度、土壤碳形态变化, 常用于SOC的来源、周转速率以及气候变化与植被重建等方面的研究。¹⁵N自然丰度法是近年来发展起来的估计自然生态系统中固氮贡献的一种新方法, 也是迄今在估计无干扰自然生态系统中固氮研究中使用最多的方法^[4]。由于化学转化、物理运输等原因, 氮素循环的诸过程均可能使得氮素发生同位素分馏, 进而反映土壤有机质的周转变化特点。因此, 运用¹³C和¹⁵N研究影响SOC的因素和规律, 可以提供更多土壤有机质的定性、定量变化特征, 是当前土壤碳研究工作中的重要手段。

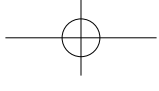
内蒙古农牧交错带是连接我国西部草原牧区和东部农耕区的生态过渡地带, 是可以与非洲的

^{*} 国家自然科学基金项目(31261140367, 31370527)、国家科技支撑项目(2012BAD14B01)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31261140367, 31370527) and the National Key Technology R&D Program of China (No. 2012BAD14B01)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mengfq@cau.edu.cn

作者简介: 张煜(1993—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究领域土壤碳氮循环。E-mail: zhangqiqi43@163.com

收稿日期: 2016-02-17; 收到修改稿日期: 2016-04-08; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-04-21



Sahel地区相提并论的气候变化最敏感的地区之一^[5]。该交错带地区面积 $61.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国农牧交错带总面积约52.8%^[6]。农牧交错带良性发展，能够成为中、东部平原农区的生态屏障，阻隔荒漠南侵；农牧交错带的生态环境退化乃至恶化，不但丧失其应有的生态屏障作用，还会通过地理链危害其下游（风）地区，发生河流泥沙输移堆积、沙尘暴等异域相关灾害^[7]。目前农牧交错带地区的生态安全形势极为严峻，水土流失、土地荒漠化现象十分普遍。特别是在该地区草地开垦后，土壤碳、氮含量降低，土壤有机碳损失^[8]。近年来以退耕还林、还草为核心的生态恢复工程，一定程度上对恢复当地生态环境、改善土壤质量起到了较好的作用，但对于土地利用变化以及施肥这两个重要的人类活动，对于土壤碳（包括SOC和土壤无机碳（soil inorganic carbon, SIC））的影响机理，还缺乏系统研究。本研究以内蒙典型农牧交错带地区不同利用方式和农田管理措施的长期试验为对象，分析土壤中碳、氮不同形态分布，结合 ^{13}C 和 ^{15}N 自然丰度分析，探讨不同土地利用及施肥管理下，栗钙土土壤碳（SOC和SIC）、氮转化规律和动态，为我国农牧交错带地区碳、氮固持提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究地点位于内蒙古武川县（ $40^\circ 47' \sim 41^\circ 23' \text{N}$ ， $110^\circ 30' \sim 111^\circ 32' \text{E}$ ），海拔1 500 ~ 1 700 m，是我国北方农牧交错带的典型区。该地区属中温带大陆性季风气候，春季干燥风沙多，夏季短促降雨少，冬季严寒时间长，年平均气温 2.5°C ，无霜期95 d左右，多年平均降水量为343.6 mm。地貌以山地和缓坡丘陵为主，山地面积 $23.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，占全县土地总面积的48%，丘陵和滩地 $25.9 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，占全县土地总面积的52%。土壤以栗钙土为主，主要养分有效含量均明显偏低，全县土壤有机质平均为 12 g kg^{-1} ，全氮平均为 1.2 g kg^{-1} 。该地区以农业为主导产业，有耕地 $9.0 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、天然草场 $2.49 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。最近四十年来，随着人口的急剧增加和对土地资源的掠夺性开发，生态环境开始退化，沙漠化面积达到 $1.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，水土流失和风蚀面积占国土总面积

的90%^[9]。本研究共选择两个长期定位试验，分别为施肥试验和土地利用方式试验。

1.2 试验处理

施肥试验：自2004年开始，试验土壤为栗钙土，质地砂壤，耕层深厚，肥力中下等。作物种植制度为马铃薯、油菜和莜麦（每年一季），每三年轮换一次。本研究选取其中5个处理，分别为化肥（NPK）、有机肥（ORG）、化肥与有机肥配施（NPK+ORG）、单施氮肥（N）和空白对照（CK），3次重复，小区随机排列，每小区面积 50 m^2 。具体施肥方案见表1。

表1 长期施肥试验方案

Table 1 Scheme of the long-term fertilization experiment				
处理 Treatments	肥料用量 Fertilizer rate (kg hm^{-2})			
	N	P_2O_5	K_2O	有机肥 Organic manure
NPK	60	45	30	0
ORG	0	0	0	7 500
NPK+ORG	60	45	30	7 500
N	60	0	0	0
CK	0	0	0	0

土地利用方式试验：始于2005年，主要退耕方式包括撂荒、种植黑麦草（*Lolium perenne* L.）和种植柠条（*Caragana korshinskii* Kom.）。撂荒后地表植物为本地种，主要包括冰草（*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.）、羊草（*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.）、阿尔泰狗娃花（*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr.）、冷蒿（*Artemisia frigid* Willd.）。本研究选取以上三种典型退耕地块，并与相邻的农田进行对比。农田的生产方式为向日葵—马铃薯—小麦轮作，一年一季，每年施用尿素、磷酸二铵，折合氮肥 $\text{N } 300 \text{ kg hm}^{-2}$ ，磷肥 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 150 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

1.3 样品采集与分析

土壤样品采集：在2013年秋季用土钻（直径3.5 cm，采样器深度20 cm）进行表土（0 ~ 20 cm）采样。每个试验小区按对角线取样，每条对角线取3钻，每个样品由6钻土混合而成，同时用环刀法测定容重。每种土地利用方式采集5个重复。土壤样品运回实验室后风干，过2 mm筛并用四分法取3 ~ 4 g研磨至全部通过0.15 mm筛，烘箱 105°C

表2 供试土壤基本理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of the soils tested					
	pH ¹⁾	容重Bulk density (g cm ⁻³)	砂粒Sand (%) > 0.05 mm	粉粒Silt (%) 0.002 ~ 0.05 mm	黏粒Clay (%) < 0.002 mm
耕地 Crop land	8.11	1.44	53.3	31.1	15.6
撂荒地 Deserted land	8.27	1.59	64.3	26.3	9.4
黑麦草地 Ryegrass land	8.26	1.62	55.6	31.2	13.2
柠条地 Horqin peashrub land	8.18	1.67	55.2	20.4	24.4

烘至恒重。

土壤理化性质测定参照鲁如坤^[10]的方法。土壤容重：将自封袋密封的土样转移至已知质量铝盒中，于105℃下，烘干至恒重，测定此时的土壤样品和铝盒的总质量，计算得出土壤容重。土壤pH：将风干土样过2 mm筛后，配制成水土比（1：2.5）的悬液，用pH计测定。土壤粒径质地：用吸管法测定土壤粒级分布，根据美国制划分土壤质地类型。土壤基本理化性质见表2。

土壤全氮（TN）和全碳（TC）：采用元素分析仪（Thermo Elemental Analyzer 1112）测定。SIC采用压力传感器方法测定^[11]。SOC采用差减法，即SOC=TC-SIC。

土壤碳氮同位素丰度测定：利用同位素质谱仪（Mass spectrometry DELTA plus（Thermo Fisher Scientific, USA）及（DELTA V ADVANTAGE, Thermo公司））测定。

1.4 土壤有机碳储量和次生碳酸盐的计算

土壤有机碳储量：以某一采样深度为计算参考标准，对比不同土壤管理方式下在某一土层碳储量的差异。一般对于分*n*层的土壤剖面而言，有机碳储量的计算公式为：

$$SOC = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (SOC_i \times BF_i \times T_i) \quad (1)$$

式中，SOC为一定深度土壤有机碳储量，Mg hm⁻²；SOC_{*i*}为第*i*层土壤有机碳含量，g kg⁻¹；BD_{*i*}为第*i*层土壤容重，g cm⁻³；T_{*i*}为第*i*层土壤深度，cm；*n*为土层数。

土壤无机碳中次生碳酸盐（pedogenic carbonates, PC）比例：用下述同位素质量平衡方程式来定量PC在土壤无机碳中的比例^[12]：

$$PC(\%) = \frac{[\delta^{13}C_{soil} - \delta^{13}C_{pm}]}{[\delta^{13}C_{pc} - \delta^{13}C_{pm}]} \times 100 \quad (2)$$

式中，PC（%）为无机碳中次生碳酸盐所占的比例；δ¹³C_{soil}为某一层土壤无机碳的δ¹³C值；δ¹³C_{pm}为母质碳酸盐的δ¹³C值，本研究假定为0‰^[13]。δ¹³C_{pc}为次生碳酸盐的δ¹³C值，用下面的分馏模型进行估算^[14]：

$$\delta^{13}C(PC) = \delta^{13}C(SOM) + \Delta CO_{2diffusion} + \Delta CO_2-CaCO_3 \quad (3)$$

式中，δ¹³C（PC）为次生碳酸盐的δ¹³C估计值；δ¹³C（SOM）为土壤有机质的δ¹³C测定值；ΔCO_{2diffusion}为¹²CO₂和¹³CO₂分子之间δ¹³C值的差异，理论值为4.4‰；ΔCO₂-CaCO₃为平衡反应过程中CO₂和碳酸盐ΔCO₂值差异，本研究取20℃下的理论值+9.48‰^[15]。

1.5 数据分析

方差分析和相关性分析用SPSS 21.0软件计算，处理之间的显著性差异分析均设为*p* = 0.05水平，且平均值比较采用最小显著差异法（least significant difference, LSD）。画图采用EXCEL软件绘制。

2 结 果

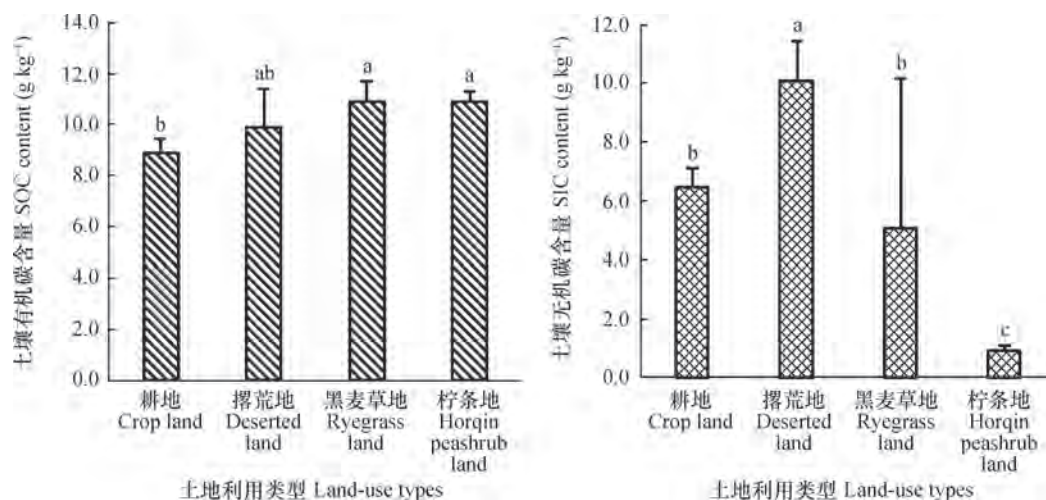
2.1 土地利用方式对土壤碳氮含量的影响

退耕还林、还草以后，即耕地转变为撂荒地、黑麦草地和柠条地，SOC含量显著增加（图1），增加幅度分别为11.8%、22.7%和22.9%；对于SIC含量，耕地低于撂荒地88.3%，与黑麦草地没有显著差异，仅高于柠条地84.6%。

不同土地利用类型条件下，土壤TC和TN含量

变化不一（图2）。总体上，除柠条地外，退耕还林还草能够增加土壤TC，其中撂荒地和黑麦草地

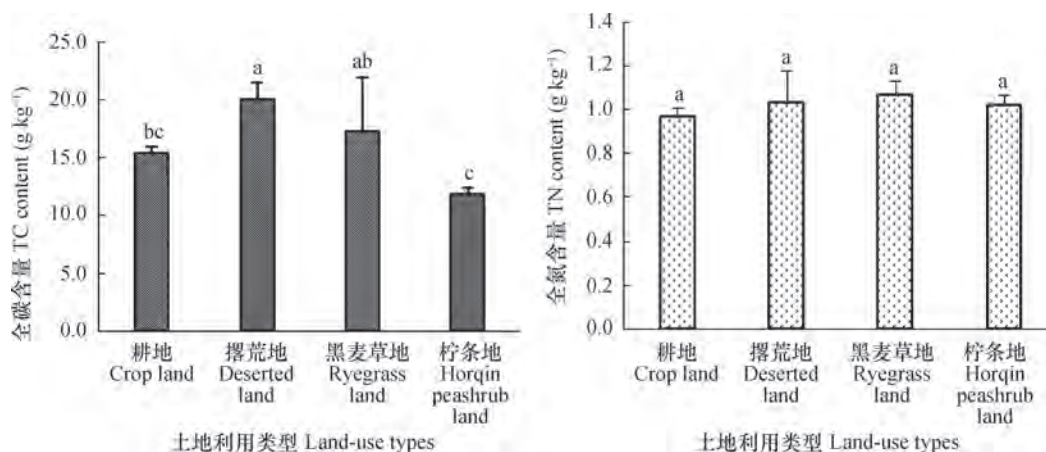
较耕地分别增加30.6%和4%。不同土地利用方式对于土壤TN含量无显著影响。



注：不同小写字母表示不同处理间的差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters indicate significance in difference between treatments at the $p < 0.05$ level

图1 不同土地利用方式的土壤有机碳和无机碳含量

Fig. 1 SOC and SIC contents in soil relative to land-use



注：不同小写字母表示不同处理间的有显著性差异 ($p < 0.05$) Note: Different lowercase letters indicate significance in difference between treatments at the $p < 0.05$ level

图2 不同土地利用方式的土壤全碳及全氮含量

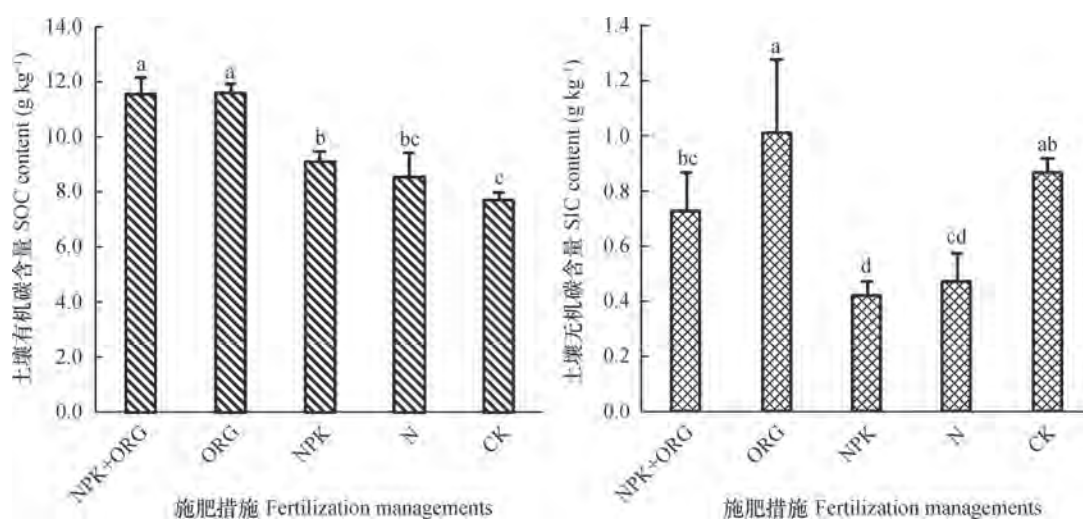
Fig. 2 TC and TN contents in soil relative to land-use

2.2 施肥措施对土壤碳氮含量的影响

不同施肥措施下SOC和SIC含量结果如图3所示。CK的SOC含量最低，为 7.7 g kg^{-1} ，NPK+ORG、ORG以及NPK处理均显著高于CK；ORG和NPK+ORG处理的SOC含量最高且相当，高于单施化肥处理（NPK，27.6%和N，36.1%）。与SOC相反，SIC在有机肥处理（ORG）中最高，次

之是CK和NPK+ORG处理，显著高于单施化肥的两个处理（NPK和N）。

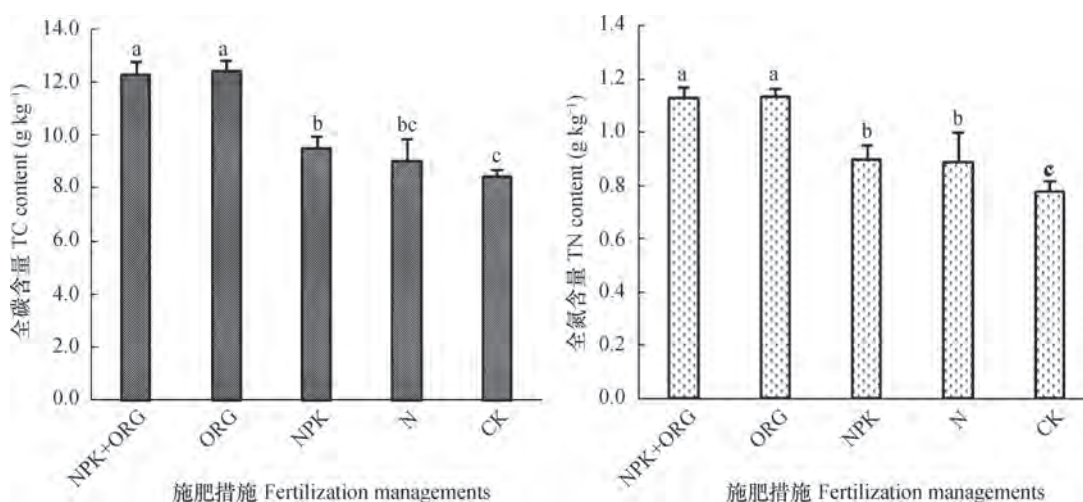
不同施肥条件下的土壤TC和TN含量见图4。总体上，土壤TC、TN含量呈现出与SOC类似的规律，即施有机肥的两个处理（ORG、NPK+ORG）显著高于CK和单施化肥处理（NPK、N），增加比例均在20%以上，而单施化肥处理间（NPK和N）无显著差异。



注：1) NPK+ORG: 化肥与有机肥配施, ORG: 有机肥, NPK: 化肥, N: 单施氮肥, CK: 空白对照; 2) 不同小写字母表示不同施肥处理间差异达到显著性水平 ($p < 0.05$) Note: 1) NPK+ORG: chemical and organic manure, ORG: organic manure, NPK: chemical fertilization, N: only nitrogen fertilizer, CK: blank control; 2) Different lowercase letters indicate significance in difference between fertilization managements at the $p < 0.05$ level

图3 不同施肥措施对土壤有机碳及无机碳含量的影响

Fig. 3 SOC and SIC contents in soil relative to fertilization



注：1) NPK+ORG: 化肥与有机肥配施, ORG: 有机肥, NPK: 化肥, N: 单施氮肥, CK: 空白对照; 2) 不同小写字母表示不同施肥处理间差异达到显著性水平 ($p < 0.05$) Note: 1) NPK+ORG: chemical and organic manure, ORG: organic manure, NPK: chemical fertilization, N: only nitrogen fertilizer, CK: blank control; 2) Different lowercase letters indicate significance in difference between fertilization managements at the $p < 0.05$ level

图4 不同施肥措施对土壤全碳及全氮含量的影响

Fig. 4 TC and TN contents in soil relative to fertilization

2.3 不同土地利用方式和施肥措施对土壤碳储量的影响

经过11年的退耕还灌/还草措施后,各类型土地的SOC储量较耕地均有显著提高(表3),其中以退耕还草(黑麦草地)增幅最大,达到 $0.98 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其次为柠条地($0.97 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

和撂荒地($0.60 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。对于SIC,撂荒地和黑麦草较耕地分别提高 1.28 和 $0.23 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。黑麦草地、耕地、柠条地的土壤PC比例在 $81.0\% \sim 96.3\%$ 之间,显著高于撂荒地(72.9%)。综合SOC和SIC储量,撂荒地和黑麦草土地利用方式较耕地显著提高土壤C储量,分别为 1.80 和 0.66

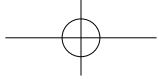


表3 土地利用方式对土壤碳储量的影响

Table 3 Effects of land-use on soil C storage

土地利用类型 Land-use types	有机碳 SOC (Mg hm ⁻²)	无机碳SIC			全碳 TC (Mg hm ⁻²)
		次生碳酸盐	原生碳酸盐	无机碳	
		Pedogenic carbonates (Mg hm ⁻²)	Lithogenic carbonates (Mg hm ⁻²)	SIC (Mg hm ⁻²)	
耕地Crop land	25.7 ± 1.7b	16.4 ± 3.0ab	2.2 ± 1.6b	18.7 ± 1.9b	44.3 ± 1.9bc
撂荒地Deserted land	32.3 ± 4.9a	23.9 ± 2.8a	8.9 ± 1.9a	32.8 ± 4.5a	64.1 ± 5.6a
黑麦草地Ryegrass land	36.5 ± 2.8a	15.2 ± 9.9b	6.1 ± 8.3ab	21.2 ± 17.5ab	51.6 ± 8.8b
柠条地Horqin peashrub land	36.4 ± 1.4a	2.9 ± 0.6c	0.1 ± 0.2b	3.0 ± 0.6c	38.7 ± 1.9c

注：平均值 ± 标准差。同一列不同小写字母表示不同处理间差异为显著性水平 ($p < 0.05$) Note: Average ± SD. Different lowercase letters in the same column indicate significance in difference between land-use types at the $p < 0.05$ level

Mg hm⁻² a⁻¹；由于SIC储量降低幅度较大，柠条地则呈现出降低C储量的趋势。

经过9年的施肥试验后，所有施肥处理的SOC储量均较CK处理有增加趋势（表4），其中施用有机肥的处理（ORG、NPK+ORG）为显著增加，分别增加1.08和1.19 Mg hm⁻² a⁻¹。对于SIC储量，ORG处理有显著增加，但幅度较小（0.03 Mg hm⁻² a⁻¹），使用化肥的三个处理（NPK+ORG、N和NPK）造

成SIC储量的降低（0.06 ~ 0.16 Mg hm⁻² a⁻¹）。对于表层土壤，CK和N处理的PC均为100%，其他三个处理也均超过75%。总体上，土壤TC储量受施肥的影响趋势与SOC一致，与CK相比，ORG、NPK+ORG、NPK和N处理的年增量分别为1.11、1.12、0.31和0.14 Mg hm⁻² a⁻¹，但仅有有机肥的两个处理（ORG、NPK+ORG）达到显著性水平 ($p < 0.05$)。

表4 施肥措施对土壤碳储量的影响

Table 4 Effects of fertilization on soil C storage

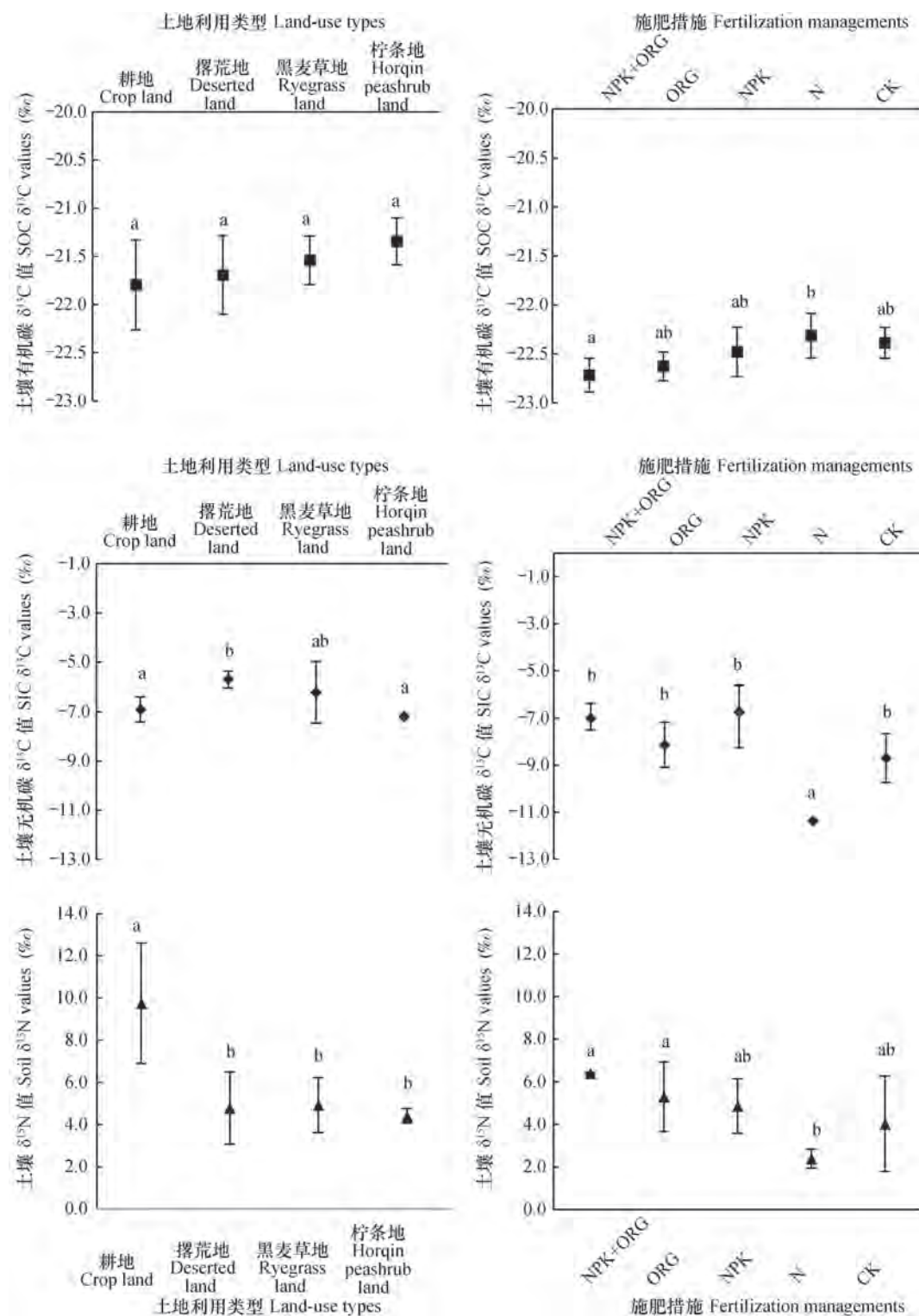
施肥措施 Fertilization managements	有机碳 SOC (Mg hm ⁻²)	无机碳SIC			全碳 TC (Mg hm ⁻²)
		次生碳酸盐	原生碳酸盐	无机碳	
		Pedogenic carbonates (Mg hm ⁻²)	Lithogenic carbonates (Mg hm ⁻²)	SIC (Mg hm ⁻²)	
NPK+ORG	34.3 ± 2.0a	1.7 ± 0.4b	0.5 ± 0.1a	2.2 ± 0.4ab	36.4 ± 1.6a
ORG	33.3 ± 0.5a	2.7 ± 0.7a	0.2 ± 0.4ab	2.9 ± 0.9a	36.3 ± 1.4a
NPK	27.9 ± 1.2b	1.1 ± 0.3b	0.2 ± 0.2ab	1.3 ± 0.2b	29.1 ± 1.3b
N	26.2 ± 4.5b	1.4 ± 0.2b	0b	1.4 ± 0.2b	27.6 ± 4.3b
CK	23.6 ± 1.6b	2.7 ± 0.3a	0b	2.7 ± 0.3a	26.3 ± 1.9b

注：平均值 ± 标准差。同一列不同小写字母表示不同处理间差异为显著性水平 ($p < 0.05$) Note: Average ± SD. Different lowercase letters in the same column indicate significance in difference between land-use types at the $p < 0.05$ level

2.4 不同土地利用方式与施肥措施对土壤碳氮同位素的影响

不同土地利用方式对于SOC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值无显著影响， $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 也处于相同水平（仅撂荒地高于（偏正）其他土地利用方式），而耕地的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著高于其他退耕土壤（图5）。施肥措施对于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 的影响远大于对 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 的影响。

就施肥措施而言，与CK相比，施用有机肥可以降低SOC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值（偏负），施用化肥可以提高 $\delta^{13}\text{C}$ 值；对于SIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则呈现相反的影响，即化肥有增加土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的趋势，有机肥对于土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 无显著影响；各施肥措施对土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 无显著影响，但单施氮肥处理（N）的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值最低。

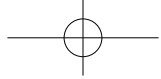


注: 1) NPK+ORG: 化肥与有机肥配施, ORG: 有机肥, NPK: 化肥, N: 单施氮肥, CK: 空白对照; 2) 不同小写字母表示不同土地利用方式或施肥处理间差异达到显著性水平 ($p < 0.05$)

Note: 1) NPK+ORG: chemical and organic manure, ORG: organic manure, NPK: chemical fertilization, N: only nitrogen fertilizer, CK: blank control; 2) Different lowercase letters indicate significance in difference between land-use types or fertilization managements at the $p < 0.05$ level

图5 不同土地利用方式及施肥措施土壤SOC与SIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 以及土壤 $\delta^{15}\text{N}$

Fig. 5 $\delta^{13}\text{C}$ values of SOC and SIC and soil $\delta^{15}\text{N}$ in soil relative to land-use and fertilization



3 讨 论

3.1 土地利用方式对土壤碳、氮动态及其同位素特征的影响

退耕还林、还草是恢复土壤肥力、提高土壤质量、提高SOC的一种有效措施^[16]。韩建国等发现，在河北坝上土地退耕后，各草地土壤有机质含量明显高于当年播种小麦地^[17]。农地经过植被恢复和撂荒，减少了对土壤的耕作压力，随植被生长发育和演替，会伴生大量草本植物，植物根系及地表枯落物可增加土壤有机质含量、有机质分解作用减缓，进而影响土壤质量和养分变化，长期而言对于区域固碳减排有积极意义^[18-19]。土地利用方式改变对SIC的影响与对SOC的影响不完全一致：与耕地相比，转变为撂荒地和黑麦草地后既增加SOC也会增加SIC，而转变为柠条地后SOC增加，SIC含量和储量却大大降低。这是由于柠条根系多在1~4 m范围内^[20]，根系入土深度增加可能会促进SIC向土壤深层淋溶，当然该猜测还需要进一步验证。

灌木林地、草地和荒地的植物优势种均是C₃植物，从植被凋落物再到SOC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐升高，主要是由于有机质分解过程中的同位素分馏^[21]。整体上各土地利用方式SOC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近，无显著差异。与SOC不同，撂荒地SIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较其他三类有植被土地利用方式的土壤高（偏正），同时原生碳酸盐储量也最高，即相比有植被的土地利用方式，由于植物有机酸和有机质分解产生的有机酸对原生碳酸盐分解较低，且原生碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值严重偏正（0‰左右），因此撂荒地SIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于其他三类土地利用方式。

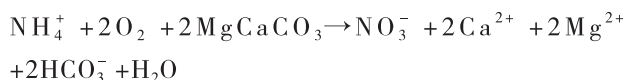
四类土地利用方式中，耕地土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著增高。主要是作物生产过程中，耕地氮投入水平显著高于其他三类土地利用类型（仅有柠条地有固氮投入），总 ^{15}N 投入量也显著增加，由于作物对无机氮吸收、氨挥发、硝化和反硝化作用， ^{14}N 优先从土壤中输出，最终导致耕地总 ^{15}N 含量明显增加，说明可利用 ^{15}N 来分析土壤中氮素的转化强度。

3.2 施肥措施对土壤碳、氮动态及其同位素特征的影响

施肥（有机肥和化肥）以后，SOC和土壤TN均呈增加趋势。这与当前国内外的研究结果一致^[3, 22]。研究发现，施肥土壤中，SOC与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值呈现类似的变化规律，即SOC含量越高、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值越低

（偏负），这符合典型耕作土壤的特征^[23]，即新鲜有机质在土壤有机碳中的比例越大， $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 越偏负。

对于SIC，化肥使用则会显著降低其含量^[24]。施入土壤中的氮肥进行铵氧化（硝化作用），该过程引起土壤酸化^[25]。产生的酸根离子与土壤中碳酸钙发生反应，从而有可能降低土壤中的无机碳含量。有研究表明，该过程甚至会超过土壤碳酸盐体系本身的平衡关系^[26]。具体反应的化学方程式如下^[24]：



假定本实验投入的氮全部与土壤碳酸钙发生上述反应，且 HCO_3^- 全部以 CO_2 的形式转化到空气中，可以得出表5的理论SIC损失量。除ORG外，其余所有施肥处理的SIC实际损失量均大于理论计算值，这与张宏杰的研究结果不同^[24]。原因可能是本试验仅考虑了表层土的SIC损失，而忽略了由于淋洗等原因导致的SIC向深层土层的迁移。对于ORG处理，SIC的增加主要是由于有机肥中本身无机碳含量较高导致的。

单施氮肥会显著降低SIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值，这是由于氮肥转化过程中酸根离子产量增加^[25]，对于原生碳酸盐的溶解量较大（表3中显示原生碳酸盐已全部去除），因此土壤无机碳主要是次生碳酸盐，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要取决于SIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值（见式（3）），严重偏负。

表5 0~20 cm土体无机碳的理论与实际损失量

Table 5 Theoretical and practical loss of SIC in the 0~20 cm soil layer

施肥措施 Fertilization managements	SIC理论损失量 Theoretical SIC loss (g kg ⁻¹)	SIC实际损失量 Actual SIC loss (g kg ⁻¹)
NPK+ORG	0.135	0.143
ORG	0.102	-0.145
NPK	0.033	0.448
N	0.034	0.396

注：正值表示损失量，负值表示增加量 Note: Positive values mean loss, and negative values mean increase

与不施肥相比，农田中施用有机肥均能增加土壤中 $\delta^{15}\text{N}$ 值，而施用化肥则增加不显著，郭智成等得到类似的规律^[27]。一方面，有机肥中其本身的

$\delta^{15}\text{N}$ 值较化肥偏高,另一方面是植物生长过程中,对于化肥中 ^{15}N 的吸收利用率要高于有机肥。施用有机肥土壤中微生物活动增加,氨挥发和反硝化均使剩余的无机氮富 ^{15}N [28],土壤有机质的 $\delta^{15}\text{N}$ 值也相应增加 [29]。

3.3 土壤有机碳向土壤无机碳的转移

土壤中 CO_2 和溶解的碳酸盐(如 CaCO_3)之间一直进行着碳稳定同位素的分馏交换,而碳酸盐发生沉淀的时间远大于同位素平衡的时间。随着时间的延长, CaCO_3 中的碳同位素丰度将主要取决于土壤中的 CO_2 气体 [30]。土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要由SOC分解、植物根系呼吸和大气中混入的 CO_2 共同决定 [31]。撂荒地SIC含量较高,其SIC来源受土壤呼吸(SOC分解和植物根系呼吸)影响相对较小,受较高 ^{13}C 值的空气 CO_2 影响相对较大,从而造成较高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 值。在PC计算模型中,假定参与形成次生碳酸盐的 CO_2 全部来源于土壤呼吸,故计算得到的撂荒地PC比例偏低。

施肥并未促进土壤上层的PC增加,这可能是由于土壤上层并没有PC的生成,也可能是PC被淋洗至下层 [32]。N施肥及CK处理的PC所占比例高达100%,即来自成土母质的原生碳酸盐(LC)全部溶解或原地风化形成PC, SIC中的碳均来自于有机质分解、植物根系分解或者大气来源的 CO_2 。可能的原因包括:1) N肥施用提高土壤酸性、溶解LC;2) 土壤冻融过程和干旱季节碳酸钙沉积速率较高有关 [33]。碳酸钙沉积时的限制因子是有效钙的数量,土壤中除方解石风化释放钙外,其他含钙矿物风化也释放钙 [34],因此,PC的形成过程可能固定了更多的碳。本研究发现,各处理SIC含量和SIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现相同变化趋势(即正相关关系),说明SIC主要由可能发生分馏作用且有较高 $\delta^{13}\text{C}$ 值的PC组成。

4 结 论

对于我国典型农牧交错带的武川地区研究表明,退耕还灌、还草可有效提高土壤有机碳库以及无机碳储量(柠条方式除外);有机肥可显著提高该地区土壤有机碳和无机碳储量,而化肥则会显著降低无机碳储量。结合土壤碳氮同位素特征,发现施肥措施对于土壤有机碳、无机碳以及氮素的转化强度远远大于土地利用方式的改变,即施肥措施对

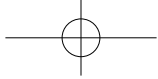
土壤有机碳的增加贡献更大,对于原生碳酸盐的降低和次生碳酸盐的增加幅度也强于土地利用方式的改变;同样,由于施肥土壤中作物带走以及氮素转化速度远高于自然土地,因而呈现出施肥土壤全氮和 $\delta^{15}\text{N}$ 的正相关关系。利用以上土壤碳氮同位素对施肥措施和土地利用的响应规律,可以从定性和定量两个层面分析农牧交错带地区土壤碳的转化特征,为该地区土地管理和固碳减排提供科学依据。作为农牧交错带地区影响固碳减排和农业生产的两项重要人类活动,土地利用和施肥措施应该在区域土地的固碳管理中给予充分和全面的考虑。

参 考 文 献

- [1] 田娜,王义祥,翁伯琦. 土壤碳储量估算研究进展. 亚热带农业研究, 2010, 6(3): 193—198
Tian N, Wang Y X, Weng B Q. Advances in estimating soil carbon storage (In Chinese). Subtropical Agriculture Research, 2010, 6(3): 193—198
- [2] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1385—1390
Yang J C, Han X G, Huang J H, et al. Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1385—1390
- [3] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应. 生态学报, 2003, 23(4): 787—796
Yang J C, Han X G, Huang J H, et al. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(4): 787—796
- [4] 苏波,韩兴国,黄建辉. ^{15}N 自然丰度法在生态系统氮素循环研究中的应用. 生态学报, 1999, 19(3): 120—128
Su B, Han X G, Huang J H. Application of ^{15}N natural abundance method to the research on nitrogen cycling in natural ecosystems (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(3): 120—128
- [5] 毛睿,龚道溢,房巧敏. 近百年中国华北农牧交错带与非洲Sahel地区环境变化的比较分析. 地理科学进展, 2007, 26(4): 51—63
Mao R, Gong D Y, Fang Q M. Comparison analysis of environmental changes between Sahel and agro-pastoral zone in Northern China (In Chinese). Progress in Geography, 2007, 26(4): 51—63
- [6] 田永明. 内蒙古农牧交错区草地资源可持续利用定量评

- 价研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学生态环境学院, 2005
- Tian Y M. Quantative evaluation on sustainable utilization of rangeland resources in the ecotone of cropland and pastoral land in Inner Mongolia (In Chinese). Hohhot: College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, 2005
- [7] 宋乃平. 农牧交错带农牧户土地利用选择机制及其环境效应. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2004
- Song N P. Mechanism and environmental effects of land use option of household in farming-grazing transitional zone (In Chinese). Beijing: College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, 2004
- [8] 尹萍, 李小刚, 李银科, 等. 开垦年限对亚高山草地土壤有机碳、氮和土壤团聚体稳定性的影响. 甘肃农业大学学报, 2008, 43 (4): 97—102
- Yin P, Li X G, Li Y K, et al. Changes in soil organic C and N and aggregate stability along a chronosequence of cultivation in sub-alpine grassland (In Chinese). Journal of Gansu Agricultural University, 2008, 43 (4): 97—102
- [9] 朱震达. 中国土地沙漠化的态势及其治理的基本模式. 中国科学基金, 1992, 6 (1): 10—17
- Zhu Z D. Status and basic control models of desertification in China (In Chinese). Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 1992, 6 (1): 10—17
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [11] Sherrod L A, Dunn G, Peterson G A, et al. Inorganic carbon analysis by modified pressure-calimeter method. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 299—305
- [12] Salomons W, Mook W G. Isotope geochemistry of carbonate dissolution and reprecipitation in soils. Soil Science, 1976, 122 (1): 15—24
- [13] Marion G M, Schlesinger W H, Fonteyn P J. CALDEP: A regional model for soil CaCO_3 (caliche) deposition in southwestern deserts. Soil Science, 1985, 139 (5): 468
- [14] Rabenhorst M C, Wilding L P, West L T. Identification of pedogenic carbonates using stable carbon isotope and microfabric analyses. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48 (1): 125—132
- [15] Nordt L C, Hallmark C T, Wilding L P, et al. Quantifying pedogenic carbonate accumulations using stable carbon isotopes. Geoderma, 1998, 82 (1): 115—136
- [16] 张丽华, 谢忠奎, 王亚军, 等. 陇中黄土高原土地利用变化对土壤有机碳、无机碳的影响. 土壤通报, 2013, 44 (2): 369—375
- Zhang L H, Xie Z K, Wang Y J, et al. The impact of land use change on soil organic carbon and soil inorganic carbon contents at Loess Plateau in Longzhong (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44 (2): 369—375
- [17] 韩建国, 韩永伟, 孙铁军, 等. 农牧交错带退耕还草对土壤有机质和氮的影响. 草业学报, 2004, 13 (4): 21—28
- Han J G, Han Y W, Sun T J, et al. Effects of returning cultivated land to herbage on soil organic matter and nitrogen in the agro-pastoral transitional zone of North China (In Chinese). Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13 (4): 21—28
- [18] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响. 应用生态学报, 2004, 15 (12): 2292—2296
- Gong J, Chen L D, Fu B J, et al. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15 (12): 2292—2296
- [19] 郭彦军, 韩建国. 农牧交错带退耕还草对土壤化学性质的影响. 草地学报, 2008, 16 (4): 386—391
- Guo Y J, Han J G. Effects of returning cultivated land to grassland on soil chemical properties in the agro-pastoral transitional zone of northern China (In Chinese). Acta Agrestia Sinica, 2008, 16 (4): 386—391
- [20] 牛西午, 丁玉川, 张强, 等. 柠条根系发育特征及有关生理特性研究. 西北植物学报, 2003, 23 (5): 860—865
- Niu X W, Ding Y C, Zhang Q, et al. Studies on the characteristics of Caragana root development and some relevant physiology (In Chinese). Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2003, 23 (5): 860—865
- [21] 李龙波, 涂成龙, 赵志琦, 等. 黄土高原不同植被覆盖下土壤有机碳的分布特征及其同位素组成研究. 地球与环境, 2011, 39 (4): 441—449
- Li L B, Tu C L, Zhao Z Q, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its isotopic composition for soil profiles of Loess Plateau under different vegetation conditions (In Chinese). Earth

- and Environment, 2011, 39 (4): 441—449
- [22] 王媛, 周建斌, 杨学云. 长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响. 中国农业科学, 2010, 43 (6): 1173—1180
Wang Y, Zhou J B, Yang X Y. Effects of different long-term fertilization on the fractions of organic nitrogen and nitrogen mineralization in soils (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43 (6): 1173—1180
- [23] Wynn J G, Bird M I, Wong V N L. Rayleigh distillation and the depth profile of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of soil organic carbon from soils of disparate texture in Iron Range National Park, Far North Queensland, Australia. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69 (8): 1961—1973
- [24] 张宏杰. 长期农作措施对津郊农田土壤无机碳库平衡与转化的影响. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2009
Zhang H J. Effect of long term agronomic practices on the balance and transformation of soil inorganic carbon in Tianjin (In Chinese). Beijing: College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, 2009
- [25] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. Science, 2010, 327 (5968): 1008—1010
- [26] Motta A C, Reeves D W, Touchton J T. Tillage intensity effects on chemical indicators of soil quality in two coastal plain soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2002, 33 (5/6): 913—932
- [27] 郭智成, 李玉中, 董一威, 等. 不同氮肥处理对土壤和番茄中稳定性氮同位素丰度的影响. 中国农业气象, 2013, 34 (5): 545—550
Guo Z C, Li Y Z, Dong Y W, et al. Effect of different fertilizer on the stable nitrogen isotope of tomato and soil (In Chinese). Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34 (5): 545—550
- [28] Tamm C O. Introduction: Geochemical occurrence of nitrogen//Natural nitrogen cycling and anthropogenic nitrogen emissions. Berlin, Heidelberg: Springer, 1991
- [29] Casciotti K L, Buchwald C, Santoro A E, et al. Assessment of nitrogen and oxygen isotopic fractionation during nitrification and its expression in the marine environment. Methods in Enzymology, 2011, 486: 253
- [30] 段建南, 李保国, 石元春, 等. 干旱地区土壤碳酸钙淀积过程模拟. 土壤学报, 1999, 36 (3): 318—326
Duan J N, Li B G, Shi Y C, et al. Modeling of soil CaCO_3 deposition process in arid areas (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1999, 36 (3): 318—326
- [31] 杨黎芳, 李贵桐, 李保国. 土壤发生性碳酸盐碳稳定性同位素模型及其应用. 地球科学进展, 2006, 21 (9): 973—981
Yang L F, Li G T, Li B G. Modeling and application of stable carbon isotope of pedogenic carbonate (In Chinese). Advances in Earth Science, 2006, 21 (9): 973—981
- [32] 杨黎芳. 土壤无机碳分布与施肥对其固存的影响—以内蒙古土壤和昌平长期肥料定位试验为例. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2007
Yang L F. Soil inorganic carbon distribution and effects of fertilization on its sequestration: Case study from Inner Mongolia soils and long-term fertilization experiment of Changping (In Chinese). Beijing: College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, 2007
- [33] Cerling T E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 71 (2): 229—240
- [34] 刘再华, 张美良, 游省易, 等. 碳酸钙沉积溪流中地球化学指标的空间分布和日变化特征: 以云南白水台为例. 地球化学, 2004, 33 (3): 269—278
Liu Z H, Zhang M L, You S Y, et al. Spatial and diurnal variations of geochemical indicators in a calcite-precipitating stream-Case study of Baishuitai, Yunnan (In Chinese). Geochimica, 2004, 33 (3): 269—278



Impact of Land Use and Fertilization Measures on Soil C Stock in Farming-grazing Interlacing Zone of Inner Mongolia, China

ZHANG Yu ZHANG Lin WU Wenliang MENG Fanqiao[†]

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract 【Objective】 Land use and fertilization are the two important types of human activities that can influence agricultural production and soil carbon (C) stock, especially in farming-grazing interlacing zone, like Wuchuan County, Inner Mongolia of China. 【Method】 In this study soil samples were collected from a longterm field experiment on land-use and fertilization located in Wuchuan County for analysis of soil organic carbon (SOC), soil inorganic carbon (SIC), total nitrogen (TN), $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ and $\delta^{15}\text{N}$ to investigate impacts of land-use (land planted with Horqin peashrub (*Caragana korshinskii*), land planted with ryegrass and deserted land) and fertilization (chemical fertilizer, organic manure and no fertilization) on C and nitrogen (N) transformations and C stock in the soil. 【Result】 Results show that SOC stock in the land under Horqin peashrub (*Caragana korshinskii*) or ryegrass was $0.60 \sim 0.98 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ higher than that in the crop land, and similarly, SIC was slightly higher than or on the same level, except in the land under Horqin peashrub. Compared with the deserted land, the lands under “grain for green” (planted with Horqin peashrub or ryegrass) were lower in content of primary carbonate and almost unchanged in soil TN level. Compared with CK (no fertilization), application of organic manure significantly increased SOC stock ($1.08 \sim 1.19 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), while application of chemical fertilizer decreased SIC stock, mainly of secondary carbonate, at the rate of $0.06 \sim 0.16 \text{ Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Compared with application of chemical fertilizer alone, application of organic manure and application of organic manure in combination with chemical fertilizer increased SOC and SIC stock at the rate of 0.6 and 0.1 $\text{Mg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively. Changes in land-use did not have much impact on $\delta^{13}\text{C}$ of SOC and SIC, but the crop land was significantly higher than the deserted land or the lands under “grain for green” in soil $\delta^{15}\text{N}$, due to application of chemical fertilizer. Application of organic manure significantly decreased $\delta^{13}\text{C}$ value of SOC, but application of chemical fertilizer had a reverse effect, which was further enhanced by soil acidification caused by chemical fertilization. The discrepancies between fertilization treatments in SIC loss maybe attributed to leaching of SIC into deeper soil layers, which indicates that it is necessary to do in-depth study on SOC and SIC in deeper soil layers. 【Conclusion】 The impact of fertilization on soil C and N transformation is much higher than that of changes in land-use in this farming-grazing interlacing zone. As regards the soil in the arid and semi-arid Inner Mongolia, the effects of land use and fertilization on SOC and SIC should be taken into full consideration in the management of regional C sequestration.

Key words Fertilization; Land-use; Soil organic carbon; Soil inorganic carbon; Natural isotope; C sequestration

(责任编辑：陈德明)